

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

JPA11-204494
which corresponds to
USP 6,129,281

(11) Publication number: **11204494 A**

(43) Date of publication of application: **30.07.99**

(51) Int. Cl.

H01L 21/306
H01L 27/12

(21) Application number: **10003397**

(22) Date of filing: **09.01.98**

(71) Applicant: **CANON INC**

(72) Inventor: **SAKAGUCHI KIYOBUMI**
YANAGIDA KAZUTAKA

**(54) POROUS REGION REMOVING METHOD AND
MANUFACTURE OF SEMICONDUCTOR
SUBSTRATE**

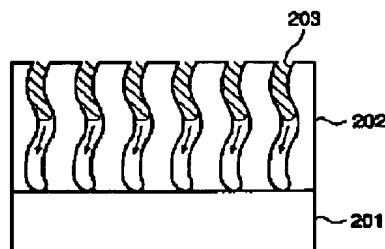
has been structurally weak is removed at a stretch.

COPYRIGHT: (C)1999,JPO

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To allow planarity of an underlayer of a porous region to be maintained, by processing the porous region while inducing ultrasonic waves into an etching solution, and thereafter by processing the porous region without inducing ultrasonic waves or inducing weaker ultrasonic waves into the etching solution.

SOLUTION: An etching solution 203 is soaked into the deepest part of the pores of a porous layer 202. During this step, ultrasonic waves are supplied to a processed object, e.g. a bonding substrate. When the ultrasonic waves are supplied, the velocity at which the solution 203 is soaked into the pores increases. Then, the pores are expanded by the etching action. During this step, no ultrasonic waves or ultrasonic waves whose strength is reduced are supplied to the processed object. Then, the layer 202 in which the walls of the pores have become thinned is removed. In this step, grinding, scrubber cleaning water jet method and the like can be applied in addition to etching. In this step, the layer 202 that



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-204494

(43) 公開日 平成11年(1999) 7 月30日

(51) Int. Cl. ⁶

識別記号

F I

H01L 21/306

H01L 21/306

B

27/12

27/12

B

審査請求 未請求 請求項の数35 O L (全19頁)

(21) 出願番号 特願平10-3397

(22) 出願日 平成10年(1998) 1 月 9 日

(71) 出願人 000001007

キヤノン株式会社

東京都大田区下丸子 3 丁目30番 2 号

(72) 発明者 坂口 清文

東京都大田区下丸子 3 丁目30番 2 号 キヤ
ノン株式会社内

(72) 発明者 柳田 一隆

東京都大田区下丸子 3 丁目30番 2 号 キヤ
ノン株式会社内

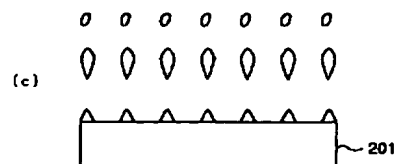
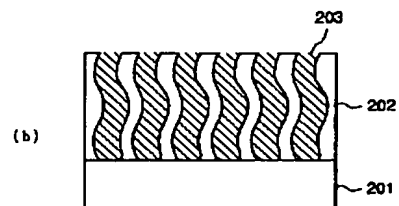
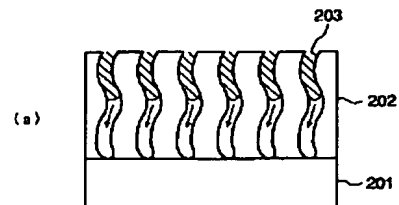
(74) 代理人 弁理士 大塚 康德 (外 2 名)

(54) 【発明の名称】 多孔質領域の除去方法及び半導体基体の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 多孔質層を除去した後の下地の平坦性を確保する。

【解決手段】 エッチング液中の処理対象の基板を浸し、第1工程では、超音波を供給して多孔質 S i 層の孔にエッチング液を染み込ませる。第2工程では、超音波の供給を中止し、エッチング作用により孔壁を薄くする。第3工程では、再度超音波を供給し、多孔質層を一気に崩壊させる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 多孔質領域を有する基体から該多孔質領域を除去する多孔質領域の除去方法であって、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 1 工程と、エッチング液に超音波を誘導することなく、又はエッチング液に前記第 1 工程において誘導する超音波よりも弱い超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 2 工程と、基体に残存する多孔質領域を除去する第 3 工程と、を含むことを特徴とする多孔質領域の除去方法。

【請求項 2】 前記第 1 工程では、エッチング液を多孔質領域の孔の深部まで染み込ませることを特徴とする請求項 1 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 3】 前記第 2 工程では、エッチング作用により多孔質領域の孔壁の厚さを所定厚以下まで薄くすることを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 4】 前記第 2 工程では、前記第 3 工程において残存する多孔質領域を一括して除去し得る程度に多孔質領域の孔壁を薄くさせることを特徴とする請求項 3 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 5】 前記第 3 工程では、基体に残存する多孔質領域をエッチング液により除去することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 6】 前記第 3 工程では、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により基体に残存する多孔質領域を除去することを特徴とする請求項 5 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 7】 処理対象の基体を同一のエッチング液に浸した状態で前記第 1 乃至第 3 工程を実行することを特徴とする請求項 5 又は請求項 6 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 8】 前記第 3 工程では、多孔質領域に対するエッチング速度が前記第 1 及び第 2 のエッチング液よりも速いエッチング液により、基体に残存する多孔質領域を除去することを特徴とする請求項 5 又は請求項 6 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 9】 処理対象の基体をエッチング液に完全に浸した状態で前記第 1 乃至第 3 工程を実行することを特徴とする請求項 5 乃至請求項 8 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 10】 処理対象の基体をエッチング液に完全に浸した状態で前記第 1 及び／又は第 2 工程を実行することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 11】 前記第 3 工程では、基体に残存する多孔質領域を高圧の流体により除去することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の多孔質領

域の除去方法。

【請求項 12】 前記第 3 工程では、基体に残存する多孔質領域をスクラバー洗浄法により除去することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 13】 エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、超音波源と該基体との相対的な位置関係を変化させることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 12 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

10 【請求項 14】 エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体をエッチング液中で揺動させることを特徴とする請求項 13 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 15】 エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体を回転させることを特徴とする請求項 13 に記載の多孔質領域の除去方法。

20 【請求項 16】 エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体及び前記超音波源の少なくとも一方の位置を超音波の振動面に対して実質的に平行又は垂直な方向に変化させることを特徴とする請求項 13 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 17】 エッチング液により基体を処理する際に、該基体を揺動又は回転させることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 12 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

30 【請求項 18】 エッチング液により基体を処理する際に、該エッチング液を循環させて該基体付近において該エッチング液の流れを形成することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 12 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 19】 前記第 1 及び第 2 工程を同一のエッチング槽内に基体を浸して実行し、前記第 1 工程では、超音波源を動作させ、第 2 工程では、該超音波源の動作を停止させることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 18 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 20】 前記第 1 及び第 2 工程を同一のエッチング槽内に基体を浸して実行し、前記第 1 及び第 2 工程において連続的に超音波源を動作させ、かつ、前記第 2 工程では、超音波源と該基体との間に超音波の遮蔽板を挟むことを特徴とする請求項 1 乃至請求項 18 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 21】 処理対象の基体は、単結晶 Si からなることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 20 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 22】 前記多孔質領域は、多孔質 Si からなることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 20 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

50 【請求項 23】 前記多孔質領域は、単結晶 Si からなる基体を陽極化成してなることを特徴とする請求項 22 に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 2 4】 エッチング液として、

(a) 弗酸

(b) 弗酸にアルコール及び過酸化水素水の少なくとも一方を添加した混合液、 (c) バッファード弗酸、

(d) バッファード弗酸にアルコール及び過酸化水素水の少なくとも一方を添加した混合液、のいずれかを使用することを特徴とする請求項 1 乃至請求項 2 3 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法。

【請求項 2 5】 半導体基体の製造方法であって、

第 1 の基体に多孔質層及び少なくとも 1 層の非多孔質層を形成する工程と、

第 1 の基体の非多孔質層側に第 2 の基体を貼り合わせる工程と、

貼り合せた基体より第 1 の基体を除去して第 2 の基体上に多孔質層を表出させる工程と、

請求項 1 乃至請求項 2 4 のいずれか 1 項に記載の多孔質領域の除去方法を適用して、第 2 の基体上の多孔質層を除去する工程と、

を含むことを特徴とする半導体基体の製造方法。

【請求項 2 6】 前記多孔質層を表出させる工程では、前記貼り合せた基体の第 1 の基体の裏面側から該第 1 の基体を研削、研磨又はエッチングすることにより、第 2 の基体上に多孔質層を表出させることを特徴とする請求項 2 5 に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 2 7】 前記多孔質層を表出させる工程では、前記貼り合せた基体を多孔質層で分割することにより、第 2 の基体上に多孔質層を表出させることを特徴とする請求項 2 5 に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 2 8】 前記非多孔質層は、単結晶 S i 層を含むことを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 2 7 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 2 9】 前記非多孔質層は、単結晶 S i 層及び S i 酸化物層を含むことを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 2 7 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 0】 前記単結晶 S i 層は、第 1 の基体の多孔質層上にエピタキシャル成長法により形成された層であることを特徴とする請求項 2 8 又は請求項 2 9 に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 1】 前記非多孔質層は、単結晶化合物半導体層を含むことを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 2 7 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 2】 前記第 2 の基体は、S i 材料からなる基体であることを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 3 1 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 3】 前記第 2 の基体は、第 1 の基体と貼り合わせる面に S i 酸化物層を有することを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 3 2 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 4】 前記第 2 の基体は、光透過性の基体で

あることを特徴とする請求項 2 5 乃至請求項 3 1 のいずれか 1 項に記載の半導体基体の製造方法。

【請求項 3 5】 多孔質領域を有する基体から該多孔質領域を除去する多孔質領域の除去装置であって、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 1 工程を実行する手段と、エッチング液に超音波を誘導することなく、又はエッチング液に前記第 1 工程において誘導する超音波よりも弱い超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 2 工程を実行する手段と、基体に残存する多孔質領域を除去する第 3 工程を実行する手段と、

を含むことを特徴とする多孔質領域の除去装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】本発明は、多孔質領域の除去方法及び半導体基体の製造方法に係り、特に、多孔質領域を有する基体から該多孔質領域を除去する方法及び該方法を適用した半導体基体の製造方法並びに多孔質領域を除去する装置に関する。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】第 1 の基板に多孔質 S i 層及び単結晶 S i 層を順に形成し、この基板を別途用意した第 2 の基板に貼り合せ、その貼り合せ基板を多孔質 S i 層において 2 枚に分離して、第 1 の基板側に形成された単結晶 S i 層を第 2 の基板側に移すことにより S O I 基板を作成する方法がある。

【 0 0 0 3 】

【発明が解決しようとする課題】上記の方法においては、貼り合せ基板を 2 枚に分離した後、第 2 の基板側の表面に残存する多孔質 S i 層を除去する。この多孔質 S i 層の除去の際、その下地である第 2 の基板の表面の平坦性、特に、該第 2 の基板の表面層である単結晶 S i 層の膜厚の均一性を阻害しないことが望まれる。

【 0 0 0 4 】本発明は、上記の背景に鑑みてなされたものであり、下地の平坦性を維持することが可能な多孔質領域の除去方法及び該方法を適用した半導体基体の製造方法を提供することを目的とする。

【 0 0 0 5 】

【課題を解決するための手段】本発明に係る多孔質領域の除去方法は、多孔質領域を有する基体から該多孔質領域を除去する方法であって、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 1 工程と、エッチング液に超音波を誘導することなく、又はエッチング液に前記第 1 工程において誘導する超音波よりも弱い超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第 2 工程と、基体に残存する多孔質領域を除去する第 3 工程とを含むことを特徴とする。

【 0 0 0 6 】上記の多孔質領域の除去方法において、前

記第1工程では、エッチング液を多孔質領域の孔の深部まで染み込ませることが好ましい。

【0007】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第2工程では、エッチング作用により多孔質領域の孔壁の厚さを所定厚以下まで薄くすることが好ましい。

【0008】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第2工程では、前記第3工程において残存する多孔質領域を一括して除去し得る程度に多孔質領域の孔壁を薄くさせることが好ましい。

【0009】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第3工程では、基体に残存する多孔質領域をエッチング液により除去することが好ましい。

【0010】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第3工程では、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により基体に残存する多孔質領域を除去することが好ましい。

【0011】上記の多孔質領域の除去方法において、処理対象の基体を同一のエッチング液に浸した状態で前記第1乃至第3工程を実行することが好ましい。

【0012】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第3工程では、多孔質領域に対するエッチング速度が前記第1及び第2のエッチング液よりも速いエッチング液により、基体に残存する多孔質領域を除去することが好ましい。

【0013】上記の多孔質領域の除去方法において、処理対象の基体をエッチング液に完全に浸した状態で前記第1乃至第3工程を実行することが好ましい。

【0014】上記の多孔質領域の除去方法において、処理対象の基体をエッチング液に完全に浸した状態で前記第1及び／又は第2工程を実行することが好ましい。

【0015】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第3工程では、基体に残存する多孔質領域を高圧の流体により除去することが好ましい。

【0016】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第3工程では、基体に残存する多孔質領域をスクラバー洗浄法により除去することが好ましい。

【0017】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、超音波源と該基体との相対的な位置関係を変化させることが好ましい。

【0018】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体をエッチング液中で揺動させることが好ましい。

【0019】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体を回転させることが好ましい。

【0020】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液に超音波を誘導しながら基体を処理する際に、該基体及び前記超音波源の少なくとも一方の位置を

超音波の振動面に対して実質的に平行又は垂直な方向に変化させることが好ましい。

【0021】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液により基体を処理する際に、該基体を揺動又は回転させることが好ましい。

【0022】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液により基体を処理する際に、該エッチング液を循環させて該基体付近において該エッチング液の流れを形成することが好ましい。

【0023】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第1及び第2工程を同一のエッチング槽内に基体を浸して実行し、前記第1工程では、超音波源を動作させ、第2工程では、該超音波源の動作を停止させることが好ましい。

【0024】上記の多孔質領域の除去方法において、前記第1及び第2工程を同一のエッチング槽内に基体を浸して実行し、前記第1及び第2工程において連続的に超音波源を動作させ、かつ、前記第2工程では、超音波源と該基体との間に超音波の遮蔽板を挟むことが好ましい。

【0025】上記の多孔質領域の除去方法において、処理対象の基体は、例えば単結晶Siからなることが好ましい。

【0026】上記の多孔質領域の除去方法において、前記多孔質領域は、例えば多孔質Siからなることが好ましい。

【0027】上記の多孔質領域の除去方法において、前記多孔質領域は、例えば単結晶Siからなる基体を陽極化成してなることが好ましい。

【0028】上記の多孔質領域の除去方法において、エッチング液として、例えば、(a) 弗酸
(b) 弗酸にアルコール及び過酸化水素水の少なくとも一方を添加した混合液、(c) バッファード弗酸、
(d) バッファード弗酸にアルコール及び過酸化水素水の少なくとも一方を添加した混合液、のいずれかを使用することが好ましい。

【0029】本発明に係る半導体基体の製造方法は、第1の基体に多孔質層及び少なくとも1層の非多孔質層を形成する工程と、第1の基体の非多孔質層側に第2の基体を貼り合せる工程と、貼り合せた基体より第1の基体を除去して第2の基体上に多孔質層を表出させる工程と、上記の多孔質領域の除去方法を適用して第2の基体上の多孔質層を除去する工程とを含むことを特徴とする。

【0030】上記の半導体基体の製造方法において、前記多孔質層を表出させる工程では、前記貼り合せた基体の第1の基体の裏面側から該第1の基体を、例えば研削、研磨又はエッチングすることにより、第2の基体上に多孔質層を表出させることが好ましい。

【0031】上記の半導体基体の製造方法において、前

記多孔質層を表出させる工程では、例えば、前記貼り合せた基体を多孔質層で分割することにより、第2の基体上に多孔質層を表出させることが好ましい。

【0032】上記の半導体基体の製造方法において、前記非多孔質層は、例えば単結晶 Si 層を含むことが好ましい。

【0033】上記の半導体基体の製造方法において、前記非多孔質層は、例えば単結晶 Si 層及び Si 酸化物層を含むことが好ましい。

【0034】上記の半導体基体の製造方法において、前記単結晶 Si 層は、例えば、第1の基体の多孔質層上にエピタキシャル成長法により形成された層であることが好ましい。

【0035】上記の半導体基体の製造方法において、前記非多孔質層は、例えば単結晶化合物半導体層を含むことが好ましい。

【0036】上記の半導体基体の製造方法において、前記第2の基体は、例えば Si 材料からなる基体であることが好ましい。

【0037】上記の半導体基体の製造方法において、前記第2の基体は、例えば、第1の基体と貼り合わせる面に Si 酸化物層を有することが好ましい。

【0038】上記の半導体基体の製造方法において、前記第2の基体は、光透過性の基体であることが好ましい。

【0039】本発明に係る多孔質領域の除去装置は、多孔質領域を有する基体から該多孔質領域を除去する装置であって、エッチング液に超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第1工程を実行する手段と、エッチング液に超音波を誘導することなく、又はエッチング液に前記第1工程において誘導する超音波よりも弱い超音波を誘導しながら該エッチング液により多孔質領域を処理する第2工程を実行する手段と、基体に残存する多孔質領域を除去する第3工程を実行する手段とを含むことを特徴とする。

【0040】

【発明の実施の形態】この発明は、例えば、第1の基板に多孔質層及び非多孔質層を順に形成し、この基板を別途用意した第2の基板に貼り合せ、その貼り合せ基板を多孔質層において2枚に分離して、第1の基板側に形成された非多孔質層を第2の基板側に移した後、第2の基板側の表面に残存する多孔質層を除去することにより、SOI 基板等の基板を作成する方法に好適である。

【0041】第1の基板の材料としては、例えば単結晶 Si 基板が好適である。この場合、多孔質層は、多孔質 Si 層となる。また、その多孔質 Si 層の上に非多孔質層として単結晶 Si 層をエピタキシャル成長させることができる。さらに、該単結晶 Si 層の上に SiO₂ 層等の絶縁層を形成してもよい。

【0042】この実施の形態では、多孔質 Si 層及び非

多孔質層を順に形成した第1の基板と別途用意した第2の基板とを貼り合わせて貼り合せ基板を作成し、該貼り合せ基板を多孔質 Si 層において2枚に分離した後に、第2の基板側に残存する多孔質 Si 層をウェットエッチング法等を適用して除去する。

【0043】多孔質 Si 層のエッチングにおいて、エッチング槽内に超音波を供給することにより多孔質 Si 層の崩壊を促進することができる。すなわち、エッチング処理の際にエッチング槽内、より詳しくは貼り合せ基板に超音波を供給することにより、多孔質 Si 層の孔壁が薄くなる前に該孔壁を崩壊させることができる。これにより、多孔質 Si 層の孔壁が崩壊し始めてから崩壊が完了するまでの時間を極めて短縮することができるため、多孔質層と該多孔質層の下地である第2の基板（例えば、単結晶 Si 基板）とのエッチング選択比を高めることができる。したがって、多孔質層を除去した後の第2の基板の面内のばらつき、更には基板間のばらつきを抑え、単結晶 Si 層の膜厚均一性の高い高品質の SOI 基板を得ることができる。

【0044】しかしながら、エッチング処理に供する基板の多孔質層の厚さにばらつきがあると、多孔質 Si 層を除去した後における第2の基板の表面層（単結晶 Si 層）の膜厚均一性を確保することが困難な場合も想定される。特に、量産工程において当該問題が発生して歩留まりが低下することが危惧される。

【0045】そこで、この実施の形態では、多孔質 Si 層の除去の後の第2の基板の表面層（単結晶 Si 層）の膜厚均一性をより確実に確保するための方法を提供する。

【0046】図1は、本発明の好適な実施の形態に係る多孔質層の除去方法の原理を説明するための図である。図1(a)～図1(c)において、201は下地の基板（第2の基板）、202は多孔質層、203はエッチング液を示す。

【0047】まず、図1(a)に示す工程では、エッチング液203を多孔質層202の孔の最深部まで染み込ませる。この際、処理の対象物（例えば、貼り合せ基板）に超音波を供給することが好ましい。超音波を供給した場合、孔内にエッチング液が染み込む速度が速いからである。

【0048】次いで、図1(b)に示す工程では、エッチング作用により孔を拡大させる。この際、処理の対象物に超音波を供給しないか、或いは、超音波の強度を小さくすることが好ましい。超音波を供給した場合、孔が拡大することにより隣接する孔の間の孔壁がある程度薄くなったところで、多孔質層の崩壊が開始するため、多孔質層の薄い部分では当該多孔質層の崩壊が早く起こり、当該部分では下地の基板201の表面がエッチングされることになるからである。この場合、基板201の表面層の膜厚均一性が阻害されることは言うまでもな

い。一方、超音波を供給しない場合は、超音波を供給した場合に比べて孔壁がより薄くならないと孔が崩壊しないため、部分的に過度にエッチングが進行することを防止することができる。

【0049】なお、処理の対象物に超音波を供給しない場合においても、エッチングは横方向（面方向）のみならず下地方向にも進む。しかし、この場合のエッチングの影響は、超音波を供給した場合に比べて軽微である。

【0050】次いで、図1（c）に示す工程では、孔壁が薄くなった多孔質層202を除去する。この工程には、エッチングの他、研磨、スクラバー洗浄、ウォータージェット法等を適用することができる。この工程では、エッチングにより構造的に脆弱になった多孔質層を一気に除去する。

【0051】図1（c）に示す工程にエッチングを適用する場合、図1（a）～図1（c）に示す工程を同一のエッチング槽を用いて実行することができる。この場合、超音波の再度の供給によって多孔質層の最深部の孔壁が全領域において一気に崩壊し得る程度に薄くなるまで図1（b）に示す工程を実行し、その後、図1（c）の工程を実行する（超音波の供給）。これにより、多孔質層を一気に除去し、処理の対象物の全域において略同時に下地である基板201を露出させることができる。したがって、エッチングのばらつきを低減し、下地である基板201の平坦性を維持することができる。

【0052】以上の多孔質層の除去方法は、多数枚の基板の一括処理に容易に適用することができる。すなわち、図1（b）に示す工程において、多数枚の処理対象の夫々に関して、多孔質層の最深部の孔壁が全領域において一気に崩壊し得る厚さに到達した後に、図1（c）に示す工程を実行すればよい。

【0053】この多孔質層の除去方法は、処理の対象物を完全にエッチング液に浸漬して行うことが好ましく、この場合、エッチング液と大気との界面付近において処理の対象物にパーティクルが付着することを防止することができる。

【0054】この多孔質層の除去方法によれば、超音波を供給することにより、エッチングを促進して多孔質層の破壊を促進する他、処理の対象物からパーティクルを効率的に除去することができる。

【0055】ここで、超音波源（例えば、超音波振動子）と処理の対象物との相対的な位置関係、より具体的には、超音波振動面とエッチング液の液面との間に生じる定在波と基板との位置関係を変化させながら多孔質層の除去を行うことにより、基板の面内の全域において均一な処理を行うことができる。この方法としては、例えば、基板を回転させる方法、基板を揺動させる方法、基板を收容したキャリアを揺動させる方法、超音波源を移動させる方法等がある。

【0056】以下に、多孔質層の除去方法の好適な応用

例を説明する。

（応用例1）この応用例は、物体の加工方法に関する。図2は、この応用例に係る加工方法を示す図である。図2（a）に示す工程では、部分的に多孔質Si部402を有するSi基板401を作成する。これは、例えば、Si基板上にレジスト膜を形成し、これをリソグラフィ工程によりパタニングした後に、その結果物を陽極化することにより得られる。ここで、レジスト膜の代わりに、例えば、パタニングしたSi₃N₄膜やワックス等を採用することもできる。このワックスとしては、耐弗酸性のワックス、例えばアビエゾンワックス（商品名）が好適である。

【0057】次いで、図2（b）に示す工程では、図2（a）に示すSi基板の表面に非多孔質層（パターン）403を形成する。

【0058】次いで、図2（c）に示す工程では、多孔質Si部402を除去する。具体的には、まず、多孔質Si部402が表出した図2（b）に示す基板を、多孔質Si用のエッチング液をエッチング槽に満たしたエッチング装置にセットし、超音波を供給しながらエッチングを行う。

【0059】多孔質Si部402の孔にエッチング液が十分に染み込んだら、超音波の供給を中止し、エッチングを続行する。この処理において、多孔質Si部402の孔壁が次第に薄くなる。この時、表面（図中の下方）から見た多孔質Si部402の色も次第に薄くなり、十分に孔壁が薄くなると下地である非多孔質層（パターン）403が透けて見えるようになる。

【0060】この状態で、残存した多孔質Si部を除去する。この除去の方法としては、例えば、1）再度超音波を供給しながらエッチングする方法、2）Siのエッチング速度が高いエッチング液によりエッチングする方法等がある。

【0061】なお、強固な構造物を残すのであれば、ウォータージェット法により多孔質Si部を除去してもよい。

【0062】ここで、Si基板401の全体を多孔質Siにすることにより、該基板上に形成された非多孔質層のみを残すことができる。また、上記の例の如く非多孔質層403をパタニングしておくことにより、例えば、図2（c）に示す片持ち梁のように、種々の構造体を形成することができる。

【0063】（応用例2）この応用例は、半導体基板の製造方法に関する。図3は、この応用例に係る半導体基板の製造方法に関する。まず、図3（a）に示す工程では、第1のSi単結晶基板501を用意して、その片面に多孔質Si層502を形成する。次いで、図3（b）に示す工程では、多孔質Si層502の表面に少なくとも1層の非多孔質層503を形成する。この非多孔質層503としては、例えば、単結晶Si層、多結晶Si

層、非晶質Si層、金属層、化合物半導体層、超伝導層等が好適である。また、この非多孔質層503として、MOSFET等の素子構造を含む層を形成してもよい。更に、最表面層にSiO₂層504を形成してこれを第1の基板とすることが好ましい。このSiO₂層504は、後続の工程で第1の基板と第2の基板505とを貼り合わせた際に、その貼り合わせの界面の界面準位を活性層から離すことができるという意味でも有用である。

【0064】次いで、図3(d)に示すように、別途用意した第2の基板505と図3(c)に示す第1の基板とを、SiO₂層504を挟むようにして、室温で密着させる。その後、陽極接合処理、加圧処理、あるいは必要に応じて熱処理を施すこと、あるいはこれらの処理を組み合わせることにより、貼り合わせを強固なものにしても良い。

【0065】なお、非多孔質層503として、単結晶Si層を形成した場合には、例えば該単結晶Si層の表面に熱酸化等の方法によってSiO₂層504を形成した後に第2の基板505と貼り合わせることが好ましい。

【0066】第2の基板505としては、Si基板、Si基板上にSiO₂層を形成した基板、石英等の光透過性の基板、サファイヤ等が好適である。しかし、第2の基板505は、貼り合わせに供される面が十分に平坦であれば十分であり、他の種類の基板であっても良い。

【0067】なお、図3(d)は、SiO₂層504を介して第1の基板と第2の基板とを貼り合わせた状態を示しているが、このSiO₂層504は、非多孔質層503または第2の基板がSiでない場合には設けなくても良い。

【0068】また、貼り合わせの際には、第1の基板と第2の基板との間に絶縁性の薄板を挟んでも良い。

【0069】次いで、図3(e)に示す工程では、多孔質Si層502を境にして、第1のSi基板501側を第2の基板側から除去する。除去の方法としては、研削、研磨或いはエッチング等により第1の基板側を廃棄する方法と、多孔質Si層502を境にして第1の基板側と第2の基板側とに分離する方法とがある。

【0070】次いで、図3(f)に示す工程では、第2の基板側の表面に残存する多孔質Si層502を除去する。具体的には、まず、第2の基板側を多孔質Siのエッチング液をエッチング槽に満たしたエッチング槽にセットし、超音波を供給しながらエッチングを行う。

【0071】多孔質Si部の孔にエッチング液が十分に染み込んだら、超音波の供給を中止し、エッチングを続行する。この処理において、多孔質Si層502の孔壁が次第に薄くなる。この時、表面から見た多孔質Si層502の色も次第に薄くなり、十分に孔壁が薄くなると下地である非多孔質層(例えば、単結晶Si層)503が透けて見えるようになる。

【0072】この状態で、残留した多孔質Si層502

を除去する。この除去の方法としては、例えば、1) 再度超音波を供給しながらエッチングする方法、2) Siのエッチング速度が高いエッチング液によりエッチングする方法、3) ウォータージェット法により多孔質Si層502を除去する方法、4) 多孔質Si層502を研磨する方法、5) スクラバー洗浄する方法等がある。

【0073】図3(f)は、上記の方法で得られる半導体基板(SOI基板)を概略的に示す図である。第2の基板505上に絶縁層(例えば、SiO₂層)504を介して非多孔質層(例えば、単結晶Si層)503が平坦かつ均一な膜厚で形成される。この方法によれば、良好な品質を有する大面積の半導体基板を製造することができる。

【0074】例えば、第2の基板505として絶縁性の基板を採用すると、上記の製造方法によって得られる半導体基板は、絶縁された電子素子の形成に極めて有用である。

【0075】ここで、図3(d)に示す貼り合せ基板を多孔質Si層502で分割した場合には、第1の基板501上に残留する多孔質Si層502を除去して、必要に応じて、その表面を平坦化した後に、再利用することができる。

【0076】次に、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の具体例を列挙する。

【0077】(処理装置の構成例1) 図4は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す斜視図である。

【0078】このウェハ処理装置100のうち処理液が接触し得る部分は、用途に応じて、石英、プラスチック等で構成することが好ましい。プラスチックとしては、例えば、弗素樹脂、塩化ビニール、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリブチレンテレフタレート(PBT)またはポリエーテルエーテルケトン(PEEK)等が好適である。このうち弗素樹脂としては、例えば、PVD F、PFA、PTFE等が好適である。

【0079】このウェハ処理装置100は、ウェハ処理槽110と、オーバーフロー槽120と、超音波槽130と、ウェハ140を回転させながら支持するウェハ回転機構(111~119)とを有する。

【0080】ウェハを処理する際には、ウェハ処理槽110に処理液(エッチング液)を満たす。ウェハ処理槽110の上部の周囲には、ウェハ処理槽110から溢れた処理液を一旦貯留するためのオーバーフロー槽120が設けられている。オーバーフロー槽120に一旦貯留された処理液は、オーバーフロー槽120の底部から循環器121に向けて排出パイプ21aを通して排出される。循環器121は、排出された処理液をフィルタリングしてパーティクルを除去し、供給パイプ121bを介してウェハ処理槽110の底部に送り出す。したがって、ウェハ処理槽110内のパーティクルが効率的に除去され

る。

【0081】ウェハ処理槽 110 の深さは、ウェハ 140 が完全に埋没する深さにすることが好ましく、これにより大気中や液面付近のパーティクルがウェハ 140 に吸着することを防止することができる。

【0082】ウェハ処理槽 110 の下部には、超音波槽 30 が配置されている。超音波槽 130 の内部には、調整機構 132 により超音波源 131 が支持されている。この調整機構 132 は、超音波源 131 とウェハ処理槽 110 との相対的な位置関係を調整する機構として、超音波源 131 の上下方向の位置を調整するための機構と、水平面内の位置を調整するための機構とを有し、この機構により、ウェハ処理槽 110、より詳しくはウェハ 140 に供給される超音波を最適化することができる。超音波源 131 は、発生する超音波の周波数や強度を調整する機能を備えることが好ましく、これにより超音波の供給をさらに最適化することができる。このように、ウェハ 140 に対する超音波の供給を最適化するための機能を備えることにより、多様な種類のウェハに個別に対向可能になる。超音波槽 130 には、超音波伝達媒体（例えば、水）が満たされており、この超音波伝達媒体によりウェハ処理槽 110 に超音波が伝達される。

【0083】このウェハ処理装置 100 は、超音波源 131 のオン・オフを制御する制御部を有し、該制御部により、上記の多孔質層の除去処理を制御することができる。

【0084】ウェハ 140 は、ウェハ 140 に係合する溝 111a を有する 4 本のウェハ回転ロッド 111 によってウェハ処理槽 110 の底面に対して略垂直に保持される。このウェハ回転ロッド 111 は、ウェハ 140 を回転させながら支持する機能を有し、ウェハ回転機構の一部をなす。各ウェハ回転ロッド 111 は、対向する一対のロッド支持部材 118 により回動可能に支持されており、モータ 119 が発生する駆動トルクを伝達されて夫々同一方向に回転する。また、各ウェハ回転ロッド 111 は、超音波の伝達を阻害しない程度に小径にすることが好ましい。

【0085】なお、ウェハ回転ロッド 111 の本数は、少ない方が好ましいが、ウェハ 140 との摩擦力を確保することを考慮すると、ウェハ 140 の転がり方向（X 軸方向）の移動を制限する 2 本のウェハ回転ロッド 111 と、ウェハ 140 を下方から支持するための 2 本のウェハ回転ロッド 111 を設けることが好ましい。ウェハの下方に 2 本のウェハ回転ロッド 111 を適切な間隙をもって配置することにより、オリエンテーション・フラットを有するウェハに対する駆動トルクの伝達を効率化することができる。これは、ウェハの下方に 1 本のウェハ回転ロッド 111 しか存在しない場合には、当該ウェハ回転ロッド 111 上にオリエンテーション・フラットが位置する場合に、当該ウェハ回転ロッド 111 によ

てはウェハを回転させることができないからである。

【0086】通常、ウェハ処理槽 110 の底面と液面との間には定在波、すなわち、超音波の強度が強い部分と弱い部分とが形成されるが、このウェハ処理装置 100 は、ウェハ 140 を回転させながら処理することができるため、定在波に起因する処理の不均一性が低減される。

【0087】このウェハ処理装置 100 は、ウェハ処理槽 110 の底部やウェハ 40 の周囲の部材を可能な限り排除した構造を有するため、ウェハ 140 に対する超音波の供給を効率化すると共に均一化することができる。また、このような構造により、ウェハ 140 の付近における処理液の流動が自由になるため、ウェハに対する処理を均一化し、処理不良の発生を防止することができる。

【0088】（ウェハ処理装置の構成例 2）図 5 は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す図である。

【0089】このウェハ処理装置 10 のうち処理液が接触し得る部分は、用途に応じて、石英、プラスチック等で構成することが好ましい。プラスチックとしては、例えば、弗素樹脂、塩化ビニール、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリブチレンテレフタレート（PBT）またはポリエーテルエーテルケトン（PEEK）等が好適である。このうち弗素樹脂としては、例えば、PVDF、PFA、PTFE 等が好適である。

【0090】このウェハ処理装置 10 は、ウェハ処理槽 11 と、ウェハホルダ 21 をウェハ処理槽 11 内で揺動させるためのホルダ駆動機構 31 とを有する。また、ウェハ処理装置 10 は、超音波槽 61 を有することが好ましい。

【0091】ウェハを処理する際には、ウェハ処理槽 11 に処理液を満たす。ウェハ処理槽 11 には、4 面オーバーフロー槽 12 が設けられており、フィルタを内蔵した循環器 71 により処理液をウェハ処理槽 11 の底部よりウェハ処理槽 11 内に供給する。ウェハ処理槽 11 から溢れた処理液は 4 面オーバーフロー槽 12 に貯留され、4 面オーバーフロー槽 12 の底部から循環器 71 に向けて排出される。このウェハ処理装置 10 は、ホルダ駆動機構 31 によりウェハホルダ 21 を揺動させながら同時に処理液を攪拌するため、処理液の液面を一定に維持するために上記の 4 面オーバーフロー槽 12 を含む循環系が極めて有用である。

【0092】ウェハホルダ 21 は、一般に市販されている製品をそのまま使用することができるが、石英、プラスチック等で構成したものが好ましい。プラスチックとしては、例えば、弗素樹脂、塩化ビニール、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリブチレンテレフタレート（PBT）またはポリエーテルエーテルケトン（PEEK）等が好適である。このうち弗素樹脂としては、例えば、

PVDF、PFA、PTFE等が好適である。

【0093】ホルダ駆動機構31は、ウェハホルダ21を把持する一対の把持部31aを有し、この一対の把持部31aによりウェハホルダ21を把持してウェハ処理槽11内に浸漬させると共に、ウェハ処理槽11内においてウェハホルダ21を揺動させながらウェハ40に対して所望の処理を施すことができる。したがって、ホルダ駆動機構31は、一方では、前の工程が終了したウェハ40が収容されたウェハホルダ21をウェハ処理槽11に搬送する機能や次の工程に搬送する機能を有し、他方では、ウェハ処理装置10の一部としての機能を有する。

【0094】なお、この実施の形態は、把持部31aによりウェハホルダ21を保持することによりウェハ40を間接的に保持するものであるが、例えば、把持部31を吸着パッド等に置換えることにより、ウェハ40を直接的に保持可能な構成にすることもできる。また、ウェハ40の保持する方向は、ウェハ処理槽11の底面に垂直な方向に限られず、例えば、該底面に平行する方向等であっても良い。

【0095】超音波槽61内には、超音波源51が配され、超音波伝達媒体（例えば、水）で満たされている。この超音波源51は、上下及び／または左右に超音波源51の位置を調整するための調整機構62上に固定されている。この調整機構62により超音波源51とウェハ処理槽11との位置関係を調整することにより、ウェハ処理槽11、より詳しくはウェハ40に供給される超音波を最適化することができる。超音波源51は、発生する超音波の周波数や強度を調整する機能を備えることが好ましく、これにより超音波の供給をさらに最適化できる。このように、ウェハ40に対する超音波の供給を最適化するための機能を備えることにより、多様な種類のウェハに個別に対応可能になる。

【0096】このウェハ処理装置10は、超音波源51のオン・オフを制御する制御部を有し、該制御部により、上記の多孔質層の除去処理を制御することができる。

【0097】（ウェハ処理装置の構成例3）図6は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す図である。図7A～図7Eは、図6に示すウェハ処理装置の動作を示す図である。図8は、図6に示すウェハ処理装置における揺動支援部材の斜視図である。

【0098】ウェハ処理槽11の底部には、ホルダ駆動機構31によりウェハ40を揺動する際に、ウェハ40の揺動の効率を高めるための揺動支援部材13を備えることが好ましい。この揺動支援部材13は、ウェハホルダ21が移動する際に、ウェハホルダ21に保持されたウェハ40の外周部に接触し、摩擦力によりウェハ40を回転させると共にウェハホルダ21内で上下に移動させる。したがって、この揺動支援部材13は、処理後の

ウェハの面内均一性を向上させる上で有用である。

【0099】さらに、この揺動支援部材13を上下（y軸方向）及び／又は左右（x軸方向）に移動せしめる駆動機構を備えることも有効である。この場合、揺動支援部材13自体が移動することによりウェハ40を回転させると共にウェハホルダ21内で上下に移動させることができる。したがって、ホルダ駆動機構31によりウェハホルダ21を移動させる範囲を小さくすること、換言すると、ウェハ処理槽11を小型化することができる。

【0100】超音波槽61内には、超音波源51が配され、超音波伝達媒体（例えば、水）で満たされている。この超音波源51は、上下及び／または左右に超音波源51の位置を調整するための調整機構62上に固定されている。この調整機構62により超音波源51とウェハ処理槽11との位置関係を調整することにより、ウェハ処理槽11、より詳しくはウェハ40に供給される超音波を最適化することができる。超音波源51は、発生する超音波の周波数や強度を調整する機能を備えることが好ましく、これにより超音波の供給をさらに最適化できる。このように、ウェハ40に対する超音波の供給を最適化するための機能を備えることにより、多様な種類のウェハに個別に対応可能になる。

【0101】このウェハ処理装置10は、超音波源51のオン・オフを制御する制御部を有し、該制御部により、上記の多孔質層の除去処理を制御することができる。

【0102】図7A～図7Eは、ウェハの揺動方式を説明するための図である。これらの図において、矢印はウェハホルダ21の移動方向を示す。図7Aは、ウェハの揺動動作を開始する直前の状態を示している。ウェハの揺動動作の開始が指示されると、コンピュータ制御の下、まず、図7Bに示すように、ホルダ駆動機構31は把持部31aを下方向に押し下げる。この押し下げの途中でウェハ40の外周部は揺動支援部材13に接する。したがって、ウェハ40は揺動支援部材13によって下部を支えられる。

【0103】揺動支援部材13は、ウェハ40に接触する際に僅かではあるがパーティクルを発生させる可能性がある。そこで、図8に示すように先端部分をR加工することにより、滑らかにウェハ40と接するようにすることが好ましい。

【0104】揺動支援部材13は、ウェハ40の揺動を支援できれば十分であるから、超音波の伝達を阻害しないような形状、例えば、薄板状にすることができる。これにより、ウェハ40に供給される超音波を均一化し、もってウェハ40に施す処理を均一化することができる。

【0105】また、このウェハ処理装置10は、ウェハ40と揺動支援部材13との相対的な位置関係、換言すると、ウェハ40とウェハ処理槽11との相対的な位置

関係を変化させながらウェハ 4 0 に対して処理を施すため、揺動支援部材 1 3 によって生じ得る僅かな超音波の不均一性も問題とならない。ウェハホルダ 2 1 の押し下げ量は、ある程度大きい方が、ウェハ 4 0 と揺動支援部材 1 3 との接触圧力を大きくすることができるため、揺動支援部材 1 3 とウェハ 4 0 との滑りをなくして動作不良を防止することができる。これは、押し下げ量が小さすぎると、ウェハ 4 0 に対する重力が揺動支援部材 1 3 の先端部に作用する割合よりもウェハホルダ 2 1 に作用する割合が大きくなるためである。この実施の形態に係る形状の揺動支援部材 1 3 を用いた場合、押し下げ量は、ウェハ 4 0 が揺動支援部材 1 3 に接触してから 3 0 mm 程度とすることが好ましい。

【0106】ウェハホルダ 2 1 の押し下げ動作が終了すると、ホルダ駆動機構 3 1 は、コンピュータ制御の下、図 7 C に示すように、把持部 3 1 a を右方向 (x 軸の正方向) に移動させる。これにより、ウェハ 4 0 は、時計回りに回転しながら、ウェハ処理槽 1 1 内において、右方向 (x 軸の正方向) に略水平に移動する。把持部 3 1 a の移動量は、ウェハホルダ 2 1 の下部の開口部に衝突しない範囲に設定する必要がある。

【0107】ウェハホルダ 2 1 の右方向 (x 軸の正方向) への動作が終了すると、ホルダ駆動機構 3 1 は、コンピュータ制御の下、図 7 D に示すように、把持部 3 1 a を上方向に移動させる。把持部 3 1 a の移動量は、ウェハ 4 0 が処理液の液面 1 4 の近傍に至らない範囲にすることが好ましい。これは、ウェハ 4 0 が液面 1 4 の近傍に至ると、ウェハ 4 0 の表面にパーティクルが付着する虞があるからである。ウェハのホルダ 2 1 の上方向への動作が終了すると、ホルダ駆動機構 3 1 は、コンピュータ制御の下、図 7 E に示すように、把持部 3 1 a を左方向 (x 軸の負方向) へ移動させ、初期状態 (図 7 A) に戻す。

【0108】以上の動作 (図 7 A → 図 7 B → 図 7 C → 図 7 D → 図 7 E) を繰り返すことにより、ウェハ 4 0 を適切に揺動させることができ、ウェハ 4 0 に施す処理を均一化することができる。

【0109】このウェハ処理装置 1 0 に拠れば、超音波槽 6 1 を調整することによって超音波の供給が最適化された領域においてウェハ 4 0 を揺動させるため、ウェハ 4 0 に作用する超音波を最適化することができる。

【0110】ところで、超音波の定常波は定間隔で腹と節とを有することが知られている。したがって、超音波をウェハ処理槽 1 1 内において均一化することは困難である。

【0111】しかし、このウェハ処理装置 1 0 は、ホルダ駆動機構 3 1 によりウェハ 4 0 を揺動させるため、超音波の強度の不均一な分布に拘わらず、ウェハ 4 0 に対する処理を均一化することができる。なお、ウェハ 4 0 を移動させる方向は、例えば、水平方向のみ、垂直方向

のみ、斜め方向のみ等の単純なものであっても、ウェハ 4 0 に対する処理の均一化に寄与させることができる。また、ウェハ 4 0 をその軸方向 (Z 軸方向) にも揺動させることにより、水平面内における超音波の強度部分によるウェハ間の処理の不均一性等をも是正することができる。

【0112】このウェハ処理装置 1 0 は、さらに、揺動支援部材 1 3 を備えているため、ウェハ 4 0 の揺動量を効率的に高めることができる。なお、揺動支援部材 1 3 の固定位置はウェハ処理槽 1 1 の底部に限定されず、ウェハホルダ 2 1 の全ウェハ 4 0 に接触し得る構造であれば、例えば、ウェハ処理槽 1 1 の側壁に固定しても良いし、例えば、ホルダ駆動機構 3 1 に固定しても良い (この場合は、把持部 3 1 a との相対的な位置関係を変化させる機構を設ける)。

【0113】さらに、このウェハ処理装置 1 0 に拠れば、ウェハ処理槽 1 1 内に駆動機構が存在しないため、駆動機構に起因するパーティクルが発生しない。

【0114】(ウェハ処理装置の構成例 4) 図 9 は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す図である。

【0115】このウェハ処理装置 3 0 0 は、ウェハ移動機構 8 0 によって、ウェハ処理槽 1 1 の底面に対して略平行 (すなわち、超音波の振動面に対して略平行) にウェハ 4 0 を保持して、ウェハ処理槽 1 1 内の処理液 (エッチング液) に完全に浸漬した状態で揺動させることにより、ウェハ 4 0 に施す処理を均一化すると共にパーティクルによる汚染を防止するものである。

【0116】ウェハ移動機構 8 0 は、アーム 8 1 によってウェハ 4 0 を把持し、ウェハ処理槽 1 1 内においてウェハ 4 0 を揺動させる。この揺動は、超音波の振動面を横切るような方向 (すなわち、上下方向) の他、該振動面に平行な方向 (すなわち、水平方向) が好ましい。

【0117】このウェハ処理装置 3 0 0 においても、ウェハ 4 0 を処理液に完全に浸漬した状態で処理することが好ましく、この場合、処理液と気体との界面付近においてウェハ 4 0 にパーティクルが付着することを防止することができる。

【0118】このウェハ処理装置 3 0 0 に拠れば、ウェハ 4 0 をウェハ処理槽 1 1 内で揺動させることにより、ウェハ 4 0 に施す処理を均一化することができる。

【0119】(ウェハ処理装置の構成例 5) 図 1 0 は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す図である。上記の構成例 2 乃至構成例 4 に係るウェハ処理装置は、ウェハを揺動させながら処理するものであるが、この構成例に係るウェハ処理装置 5 0 0 は、ウェハを揺動させる代わりに処理液 (エッチング液) の流れを速くしたものである。

【0120】このウェハ処理装置 5 0 0 は、ウェハ処理槽 1 1 の下部にウェハホルダ 2 1 の支持部 7 3 を設け、

10

20

30

40

50

該支持部 7 3 の下部の吹き出し口 7 2 により、循環器 7 1 から供給される処理液を高速に吹き出す。支持部 7 3 には、複数の開口部が設けられており、吹き出し口 7 2 から吹き出された処理液は、この開口部を通して上方に移動する。

【0121】このように処理液の循環を高速にすることにより、ウェハ 4 0 に対する処理を均一化することができる。

【0122】なお、上記のような循環機構（7 1 ~ 7 3）を例えば図 5 に示すウェハ処理装置 1 0 に組み込むことも有効である。

【0123】（ウェハ処理装置の構成例 6）上記の各ウェハ処理装置は、超音波源を制御することにより、ウェハ処理槽に超音波を供給するか否かを切替えるものであるが、例えば、超音波源とウェハとの間に、必要に応じて超音波の伝達を遮断するための機構を設けてもよい。

【0124】ここでは一例として図 5 又は図 6 に示すウェハ処理装置の変形例を挙げる。図 1 1 は、図 5 又は図 6 に示すウェハ処理装置の変形例を示す図である。なお、図 1 1 において、オーバーフロー槽や循環器等は省略されている。

【0125】この変形例に係るウェハ処理装置は、超音波源 5 1 とウェハ処理槽 1 1 の底面との間に、必要に応じて超音波の伝達を遮断するシャッタ 9 1、9 2 を有する。このシャッタ 9 1、9 2 は、ウェハ処理槽 1 1 に超音波を伝達させる場合には、図 1 1 (a) に示すように、不図示の駆動部により開放され、ウェハ処理槽 1 1 に対する超音波の伝達を遮断する場合には、図 1 1

(b) に示すように、不図示の駆動部により閉じられる。このシャッタ 9 1、9 2 の材質としては、超音波を伝達しにくい材質、例えば、P F A や P T F E が好適である。

【0126】（ウェハ処理装置の構成例 7）図 1 2 は、多孔質層を除去するために好適なウェハ処理装置の概略構成を示す図である。図 1 2 (a) は正面図、図 1 2 (b) は側面図、図 1 2 (c) は平面図である。

【0127】このウェハ処理装置 7 0 0 は、噴射ノズル 7 0 0 よりストライプ状の流体（例えば、水）7 0 1 を噴射し、この噴射された流体によりウェハ 4 0 の多孔質層 4 0 a を除去する。

【0128】図 1 2 に示す例では、噴射ノズル 7 0 0 よりウェハ 4 0 に対して垂直に流体 7 0 1 を噴射しながら z 軸方向に該噴射ノズル 7 0 0 を走査することにより、多孔質層 4 0 a を全面にわたって除去することができる。

【0129】以下、上記の多孔質層の除去方法を適用した実施例を挙げる。

【0130】（実施例 1）まず、単結晶 S i 基板の表面に、耐 H F 性の素材からなる膜を形成し、これをパタニングして開口部を有するマスクパターンを形成した。そし

て、該開口部により露出した部分の単結晶 S i 基板に対して H F 溶液中で陽極化成処理を施して多孔質層を形成した。この処理により単結晶 S i 基板に 5 0 μ m 厚の多孔質層を形成した。次いで、マスクパターンを除去した。なお、単結晶 S i 基板の表面にマスクパターンを形成する代わりに、多孔質層を形成すべき領域のみに H F 溶液が接触し得るホルダに単結晶 S i 基板をセットして陽極化成処理を実行してもよい。次いで、結果物としての基板を図 4 に示す処理装置 1 0 0 にセットした。ここで、図 4 に示す処理装置 1 0 0 のウェハ処理槽 1 1 0 には、予め弗酸、過酸化水素水及び純水の混合液（エッチング液）を満たしておいた。この処理装置 1 0 0 において、約 2 時間、基板を回転させると共に 1 M H z 付近の超音波を印加し、多孔質 S i 層中にエッチング液を染み込ませた。

【0131】次いで、超音波源 1 3 1 の動作を停止させて、約 1 時間、基板をウェハ処理槽 1 1 0 中に放置した。これにより、多孔質 S i 層の孔壁が薄くなった。

【0132】次いで、図 1 2 に示す装置により多孔質 S i 層を完全に除去した。その結果、基板表面に深さ 5 0 μ m の凹部を有する構造体を形成することができた。

【0133】なお、図 5、図 6、図 9 に示す装置によっても、同様の構造体を形成することができることを確認した。

【0134】（実施例 2）まず、単結晶 S i 基板の表面に、耐 H F 性の素材からなる膜を形成し、これをパタニングして開口部を有するマスクパターンを形成した。そして、該開口部により露出した部分の単結晶 S i 基板に対して H F 溶液中で陽極化成処理を施して、裏面側まで至る多孔質層を形成した。この処理によりをパタニングして開口部を設け、その開口部のみ陽極化成により多孔質層を形成し、その後、マスクパターンを除去した。なお、単結晶 S i 基板の表面にマスクパターンを形成する代わりに、多孔質層を形成すべき領域のみに H F 溶液が接触し得るホルダに単結晶 S i 基板をセットして陽極化成処理を実行してもよい。次いで、結果物としての基板の表面に厚さ 1 μ m の単結晶 S i 層をエピタキシャル成長法により形成した。

【0135】次いで、結果物としての基板を図 4 に示す処理装置 1 0 0 にセットした。ここで、図 4 に示すウェハ処理装置 1 0 0 のウェハ処理槽 1 1 0 には、予め弗酸、過酸化水素水及び純水の混合液（エッチング液）を満たしておいた。この処理装置 1 0 0 において、約 6 時間、基板を回転させると共に 0. 25 M H z 付近の超音波を印加し、多孔質 S i 層中にエッチング液を染み込ませた。

【0136】次いで、超音波源 1 3 1 の動作を停止させて、約 2 時間、基板をウェハ処理槽 1 1 0 中に放置した。これにより、多孔質 S i 層の孔壁が薄くなった。

【0137】次いで、約 5 分間、再度超音波源 1 3 1 を動作させることにより、多孔質 S i 層を完全に除去し

た。その結果、多孔質 Si 層の上部に形成されていたエピタキシャル層（単結晶 Si 層）を含む単結晶 Si のメンブレンを形成することが形成できた。ここで、エピタキシャル層は、全面において略均一の厚さを有していた。

【0138】事前にエピタキシャル層（単結晶 Si 層）の一部を除去しておくことにより、例えば図 2 (c) に示すように、単結晶 Si を材料とする片持ち梁状の構造体を形成することもできる。

【0139】なお、図 5、図 6、図 9 に示す装置によっても、同様の結果を得ることができることを確認した。

【0140】（実施例 3）まず、第 1 の単結晶 Si 基板を準備し、その表面層を HF 溶液中において陽極化成することにより多孔質 Si 層を形成した。その陽極化成条件は以下の通りである。

【0141】電流密度 : 7 (mA/cm²)

陽極化成溶液 : HF:H₂O:C₂H₅OH=1:1:1

時間 : 11 (min)

多孔質 Si の厚み : 12 (μm)

次いで、この基板を酸素雰囲気中において 400℃ で 1 時間酸化させた。この酸化により多孔質 Si 層の孔の内壁は熱酸化膜で覆われた。更に、多孔質 Si 層上に CVD (Chemical Vapor Deposition) 法により厚さ 0.30 μm の単結晶 Si 層をエピタキシャル成長させた。その成長条件は以下の通りである。

【0142】ソースガス : SiH₄Cl₂/H₂

ガス流量 : 0.5/180 (l/min)

ガス圧力 : 80 (Torr)

温度 : 950 (℃)

成長速度 : 0.3 (μm/min)

次いで、このエピタキシャル Si 層の表面に熱酸化法により厚さ 200nm の SiO₂ 層を形成した。

【0143】次いで、この第 1 の基板の SiO₂ 層の表面と別途用意した Si 基板（第 2 の基板）の表面とを貼り合わせた。

【0144】次いで、第 1 の基板側を研削、研磨、エッチング等の方法により除去して、第 2 の基板上の全域に多孔質 Si 層を表出させた。

【0145】次いで、この第 2 の基板を図 4 に示すウェハ処理装置 100 にセットした。ここで、図 4 に示すウェハ処理装置のウェハ処理槽 110 には、予め弗酸、過酸化水素水及び純水の混合液（エッチング液）を満たしておいた、この処理装置 100 において、約 1.5 時間、第 2 の基板を回転させると共に 0.25MHz 付近の超音波を印加し、多孔質 Si 層中にエッチング液を染み込ませた。

【0146】次いで、超音波源 131 の動作を停止させて、約 1 時間、基板をウェハ処理槽 110 中に放置した。これにより、多孔質 Si 層の孔壁が薄くなった。

【0147】次いで、約 5 分間、再度超音波源 131 を

動作させることにより、多孔質 Si 層を完全に除去した。この際、例えば図 10 に示すように、エッチング液を適度に循環させた方が、処理後の基板の面内の均一性が良くなる。

【0148】ここで、多孔質 Si 層のエッチング液に超音波を印加し、基板を回転させると共にエッチング液を循環させながら、該基板の多孔質層にエッチング液を染み込ませ、その後、超音波の印加を中断して相応の時間だけ放置することにより、全基板に関して、面内の全域にわたり多孔質 Si 層の孔壁の厚さを十分に薄くすることができる。このため、再度超音波を印加することにより、全基板の全域にわたって均一に、残留している多孔質 Si を一括して除去することができる。

【0149】なお、図 5、図 6、図 9 に示す装置によっても、同様の結果を得ることができることを確認した。

【0150】ここで、超音波の印加を中断した後において、再度超音波を印加する方法の代わりに以下に列挙する各方法を採用した場合においても、残留した多孔質 Si 層を高品位に除去することができる。

(例 1) 弗酸、硝酸及び純水の混合液に 5 秒程度浸して多孔質 Si 層を除去する方法。

(例 2) 多孔質 Si 層を研磨により除去する方法。

(例 3) 多孔質 Si 層をスクラパー洗浄により除去する方法。

(例 4) 例えば 1000kg/cm² の圧力でウォータージェットを噴射しながら基板上を走査することにより多孔質 Si 層を除去する方法。

【0151】上記の多孔質 Si 層の除去の工程において、単結晶 Si はエッチストップとして機能し、多孔質 Si 層が選択的にエッチングされて完全に除去された。

【0152】上記のエッチング液に対する非多孔質の Si 単結晶のエッチング速度は極めて低く、多孔質層のエッチング速度との選択比は 10⁵ 以上であり、非多孔質層のエッチング量（数十オングストローム程度）は、実用上許容可能な量である。

【0153】以上の工程により、Si 酸化膜上に 0.2 μm の厚みを持った単結晶 Si 層を有する SOI 基板を形成することができた。形成された単結晶 Si 層の膜厚を面内の全面にわたって 100 点について測定したところ、膜厚は 201nm ± 4nm であった。

【0154】さらに、上記の結果物に対して水素中において 1100℃ で熱処理を 1 時間施した後に、表面粗さを原子間力顕微鏡で評価したところ、5 μm 角の領域での平均 2 乗粗さはおおよそ 0.2nm であった。これは通常市販されている Si ウエハと同等である。

【0155】透過電子顕微鏡による断面観察の結果、単結晶 Si 層には新たな結晶欠陥は導入されておらず、良好な結晶性が維持されていることが確認された。

【0156】なお、酸化膜 (SiO₂) をエピタキシャル層の表面でなく、第 2 の基板の表面に形成した場合或

いは双方に形成した場合においても同様の結果が得られた。

【0157】また、第2の基板として石英等の光透過性の基板を用いた場合においても良好な結果を得ることができた。ただし、この場合、石英と単結晶Si層との熱膨張係数の差により単結晶Si層にスリップが入るおそれがあるため、水素中において熱処理する温度を1100℃から1000℃以下にした。

【0158】(実施例4) 第1の単結晶Si基板に対してHF溶液中において2段階の陽極化成を施し、2層の多孔質層を形成した。この陽極化成条件は以下の通りであった。

【0159】<第1段階の陽極化成>

電流密度 : 7 (mA/cm²)
陽極化成溶液 : HF:H₂O:C₂H₅OH=1:1:1
時間 : 5 (min)
多孔質Siの厚み : 5.5 (μm)

<第2段階の陽極化成>

電流密度 : 30 (mA/cm²)
陽極化成溶液 : HF:H₂O:C₂H₅OH=1:1:1
時間 : 110 (sec)
多孔質Siの厚み : 3 (μm)

次いで、この基板を酸素雰囲気中において400℃で1時間酸化させた。この酸化により多孔質Si層の孔の内壁は熱酸化膜で覆われた。更に、この多孔質Si層上にCVD (Chemical Vapor Deposition) 法により厚さ0.15 μmの単結晶Si層をエピタキシャル成長法により形成した。この成長条件は以下の通りである。

【0160】ソースガス : SiH₄Cl₂/H₂

ガス流量 : 0.5/180 (l/min)
ガス圧力 : 80 (Torr)
温度 : 950 (℃)

成長速度 : 0.3 (μm/min)

次いで、このエピタキシャルSi層の表面に熱酸化法により厚さ100nmのSiO₂層を形成した。

【0161】次いで、この第1の基板のSiO₂層の表面と別途に用意したSi基板 (第2の基板) の表面とを貼り合わせた。

【0162】次いで、30 mA/cm²の電流密度 (第2段階の陽極化成) で形成した多孔質Si層で、貼り合せた基板を2分割し、第2の基板側の全面に多孔質Si層を表出させた。分割方法としては、機械的に引っ張る方法、ねじる方法、加圧する方法、楔を入れる方法、端面から酸化して剥がす方法、熱応力を利用する方法、超音波を加える方法、ウォータージェットを貼り合わせた基板に挟入する方法等が好適である。

【0163】次いで、この第2の基板を図4に示すウェハ処理装置100にセットした。ここで、図4に示すウェハ処理装置のウェハ処理槽110には、予め弗酸、過酸化水素水及び純水の混合液 (エッチング液) を満たし

ておいた、この処理装置100において、約1.5時間、第2の基板を回転させると共に0.25MHz付近の超音波を印加し、多孔質Si層中にエッチング液を染み込ませた。

【0164】次いで、超音波源131の動作を停止させて、約1時間、基板をウェハ処理槽110中に放置した。これにより、多孔質Si層の孔壁が薄くなった。

【0165】次いで、約5分間、再度超音波源131を動作させることにより、多孔質Si層を完全に除去した。この際、例えば図10に示すように、エッチング液を適度に循環させた方が、処理後の基板の面内の均一性が良くなる。

【0166】ここで、多孔質Si層のエッチング液に超音波を印加し、基板を回転させると共にエッチング液を循環させながら、該基板の多孔質層にエッチング液を染み込ませ、その後、超音波の印加を中断して相応の時間だけ放置することにより、全基板に関して、面内の全域にわたり多孔質Si層の孔壁の厚さを十分に薄くすることができる。このため、再度超音波を印加することにより、全基板の全域にわたって均一に、残留している多孔質Siを一括して除去することができる。

【0167】なお、図5、図6、図9に示す装置によっても、同様の結果を得ることができることを確認した。

【0168】ここで、超音波の印加を中断した後に、再度超音波を印加する方法の代わりに以下に列挙する各方法を採用した場合においても、残留した多孔質Si層を高品位に除去することができる。

(例1) 弗酸、硝酸及び純水の混合液に5秒程度浸して多孔質Si層を除去する方法。

(例2) 多孔質Si層を研磨により除去する方法。

(例3) 多孔質Si層をスクラパー洗浄により除去する方法。

(例4) 例えば1000kg/cm²の圧力でウォータージェットを噴射しながら基板上を走査することにより多孔質Si層を除去する方法。

【0169】上記の多孔質Si層の除去の工程において、単結晶Siはエッチストップとして機能し、多孔質Si層が選択的にエッチングされて完全に除去された。

【0170】上記のエッチング液に対する非多孔質のSi単結晶のエッチング速度は極めて低く、多孔質層のエッチング速度との選択比は10⁵以上であり、非多孔質層のエッチング量 (数十オングストローム程度) は、実用上許容可能な量である。

【0171】以上の工程により、Si酸化膜上に0.1 μmの厚みを持った単結晶Si層を有するSOI基板を形成することができた。形成された単結晶Si層の膜厚を面内の全面にわたって100点について測定したところ、膜厚は101nm±3nmであった。

【0172】さらに、上記の結果物に対して水素中において1100℃で熱処理を1時間施した後に、表面粗さを原

子間力顕微鏡で評価したところ、5 μ m角の領域での平均2乗粗さはおよそ0.2nmであった。これは通常市販されているSiウエハと同等である。

【0173】透過電子顕微鏡による断面観察の結果、Si層には新たな結晶欠陥は導入されておらず、良好な結晶性が維持されていることが確認された。

【0174】酸化膜は、エピタキシャル層表面でなく、第2の基板表面に形成しても、あるいは、その両者に形成しても同様の結果が得られた。

【0175】また、第2の基板として石英等の光透過性ウエハを用いても、本実施例は、同様に実施できた。ただし、石英とSi層との熱膨張係数の差により単結晶Si層にスリップがはいるため、水素中1100℃での熱処理は、温度を1000℃以下に下げたおこなった。

【0176】透過電子顕微鏡による断面観察の結果、単結晶Si層には新たな結晶欠陥は導入されておらず、良好な結晶性が維持されていることが確認された。

【0177】なお、酸化膜(SiO₂)をエピタキシャル層の表面でなく、第2の基板の表面に形成した場合或いは双方に形成した場合においても同様の結果が得られた。

【0178】また、第2の基板として石英等の光透過性の基板を用いた場合においても良好な結果を得ることができた。ただし、この場合、石英と単結晶Si層との熱膨張係数の差により単結晶Si層にスリップが入るおそれがあるため、水素中において熱処理する温度を1100℃から1000℃以下にした。

【0179】一方、第1の基板側に残った多孔質Si層を選択的にエッチングし、その後、水素アニール又は表面研磨等の表面処理を施すことにより、第1の基板又は第2の基板として再利用することができた。

【0180】なお、陽極化成により形成する多孔質層を1層構造とした場合においても略同様の結果が得られた。

【0181】上記の実施例において、多孔質Si層上に単結晶Si層を形成するエピタキシャル成長法としては、CVD法その他、MBE法、スパッタ法、液相成長法等が好適である。また、多孔質Si層上には、GaAs、InP等の単結晶化合物半導体をエピタキシャル成長させることもできる。この場合、GaAs on Si、GaAs on Glass(Quartz)等の高周波デバイス、OEICに適した基板を作製することができる。。

【0182】また、多孔質Si層を選択的にエッチングするためのエッチング液は、49%の弗酸と30%の過酸化水素水と水との混合液が好適であるが、以下に列挙するエッチング液も好適である。多孔質Siは、膨大な表面積を有するため、選択的なエッチングが容易だからである。

(a) 弗酸

(b) 弗酸にアルコールおよび過酸化水素水の少なくとも

一方を添加した混合液(c) バッファード弗酸

(d) バッファード弗酸にアルコールおよび過酸化水素水の少なくとも一方を添加した混合液

(e) 弗酸・硝酸・酢酸の混合液

また、上記の実施例では、超音波の印加を中断する方法として、超音波源の動作を停止させる方法を挙げているが、例えば、図11に示すように、シャッターを用いる方法も有効である。

【0183】以上、特定の実施の形態及び実施例を挙げて特徴的な技術的思想を説明したが、本発明は、これらの実施の形態及び実施例に記載された事項によって限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載された技術的思想の範囲内において様々な変形をなし得る。

【0184】

【発明の効果】本発明によれば、例えば、多孔質領域の下地の平坦性を維持することができる。

【0185】

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の好適な実施の形態に係る多孔質層の除去方法の原理を説明するための図である。

【図2】多孔質層の除去方法の第1の応用例に係る加工方法を示す図である。

【図3】本発明の好適な実施の形態に係る半導体基体の製造方法を示す図である。

【図4】構成例1に係るウエハ処理装置を示す斜視図である。

【図5】構成例2に係るウエハ処理装置を示す図である。

【図6】構成例3に係るウエハ処理装置を示す図である。

【図7A】図6に示すウエハ処理装置の動作を示す図である。

【図7B】図6に示すウエハ処理装置の動作を示す図である。

【図7C】図6に示すウエハ処理装置の動作を示す図である。

【図7D】図6に示すウエハ処理装置の動作を示す図である。

【図7E】図6に示すウエハ処理装置の動作を示す図である。

【図8】図6に示すウエハ処理装置における揺動支援部材の斜視図である。

【図9】構成例4に係るウエハ処理装置を示す図である。

【図10】構成例5に係るウエハ処理装置を示す図である。

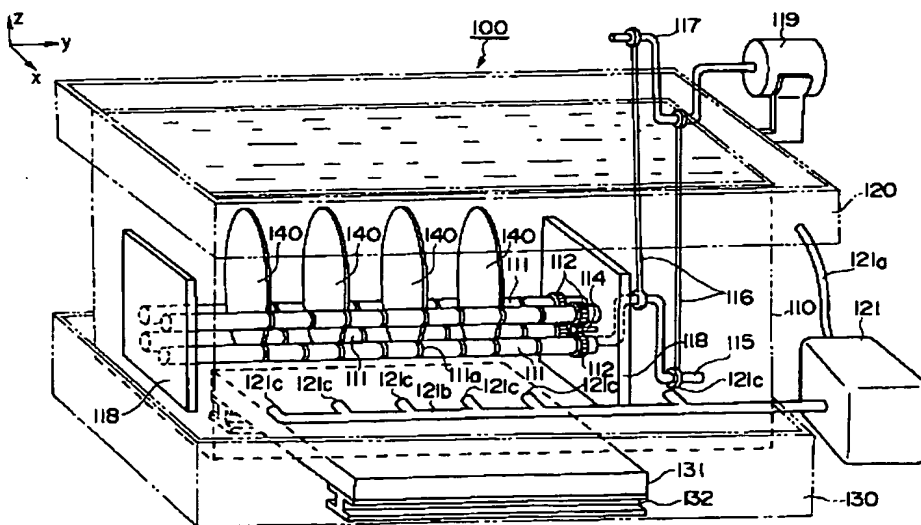
【図11】図5又は図6に示すウエハ処理装置の変形例を示す図である。

【図12】構成例7に係るウエハ処理装置を示す図である。

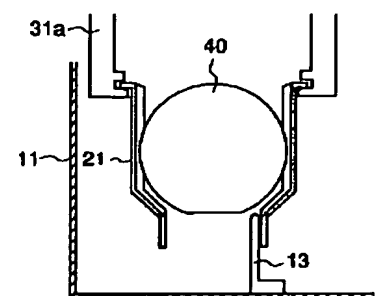
【符号の説明】

- | | |
|------------------------|-------------------|
| 201 基板 | 130 超音波槽 |
| 202 多孔質層 | 131 超音波源 |
| 203 エッチング液 | 132 調整機構 |
| 401 基板 | 140 ウェハ |
| 402 多孔質Si部 | 11 ウェハ処理槽 |
| 403 非多孔質層 | 12 4面オーバーフロー槽 |
| 501 単結晶Si基板 | 13, 13' 揺動支援部材 |
| 502 多孔質Si層 | 13a, 13b 溝 |
| 503 非多孔質層 | 14 液面 |
| 504 SiO ₂ 層 | 10 21 ウェハホルダ |
| 505 第2の基板 | 31, 31' ホルダ駆動機構 |
| 110 ウェハ処理槽 | 31a, 31a' 把持部 |
| 111 ウェハ回転ロッド | 31b 開閉用ロッド |
| 111a 溝 | 31c 水平駆動軸 |
| 112 駆動力伝達ギア | 31d 垂直駆動軸 |
| 114 中間ギア | 40 ウェハ |
| 114a 駆動力伝達ギア | 40a 多孔質層 |
| 115 クランク | 51 超音波源 |
| 116 連結ロッド | 61 超音波槽 |
| 117 クランク | 20 62 調整機構 |
| 118, 118' ロッド支持部材 | 71 循環器 |
| 119 モータ | 72 循環吹き出し口 |
| 120 オーバーフロー槽 | 80 ウェハ移動機構 |
| 121 循環器 | 81 アーム |
| 121a 排出パイプ | 91, 92 超音波遮断シャッター |
| 121b 供給パイプ | 10 ウェハ処理装置 |
| 121c 供給口 | 700 噴射ノズル |
| | 701 流体 |

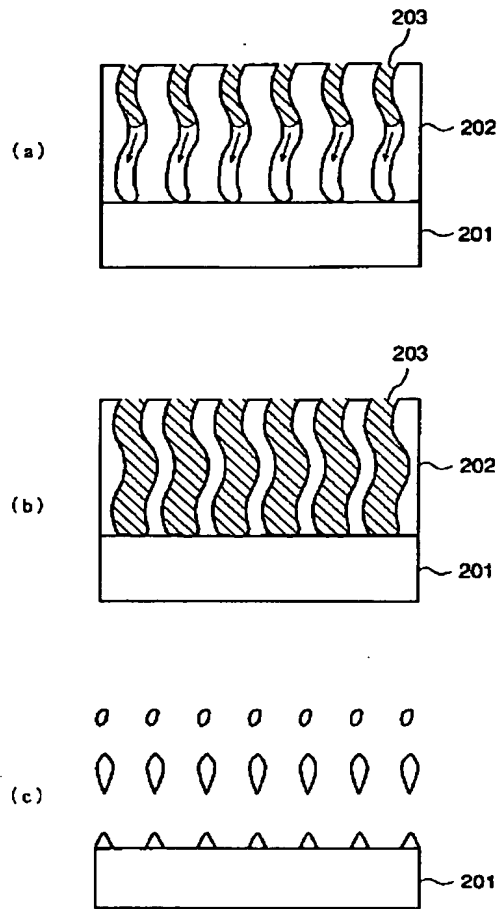
【図4】



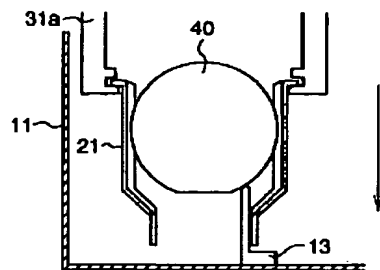
【図7A】



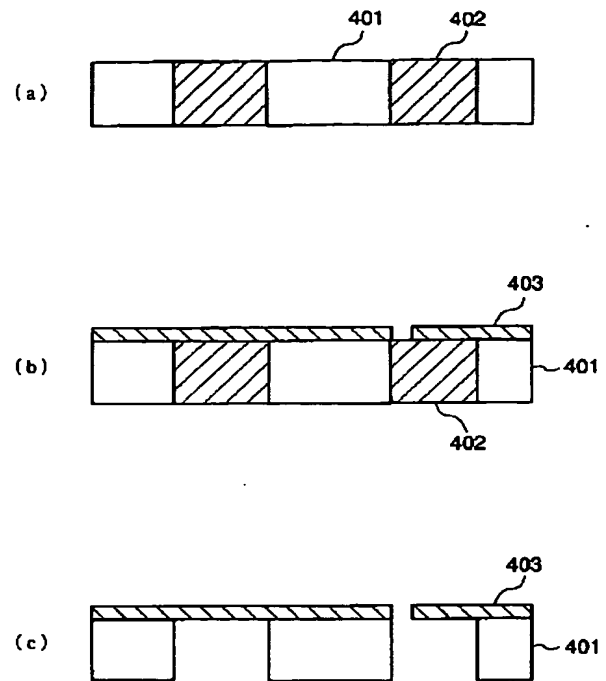
【図 1】



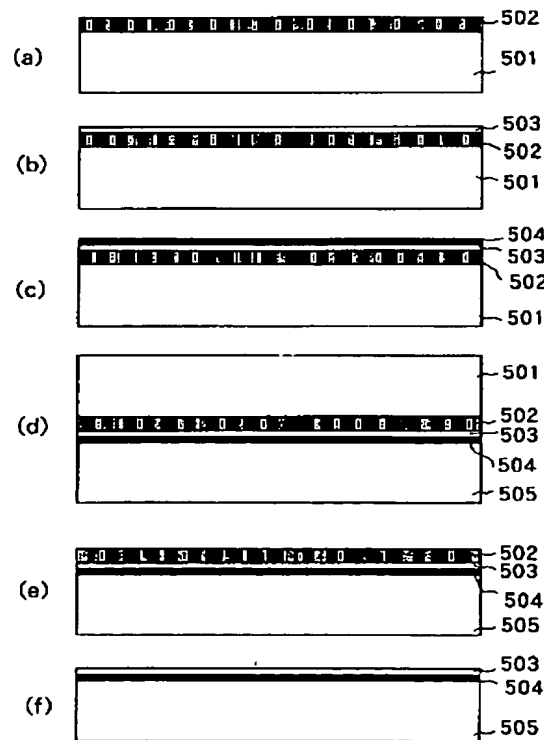
【図 7 B】



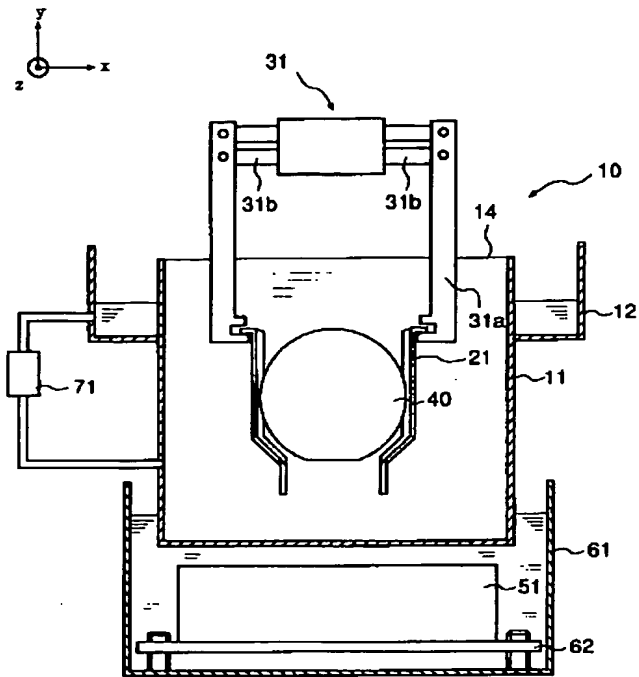
【図 2】



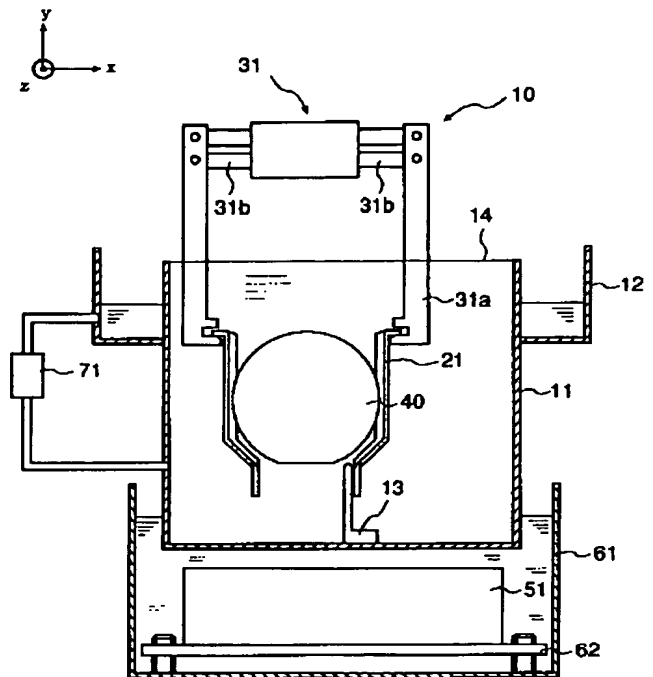
【図 3】



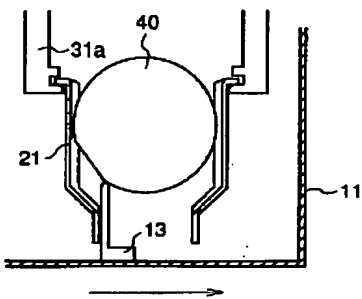
【図 5】



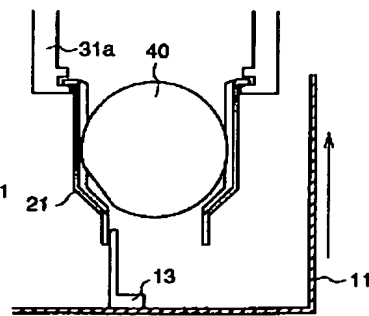
【図 6】



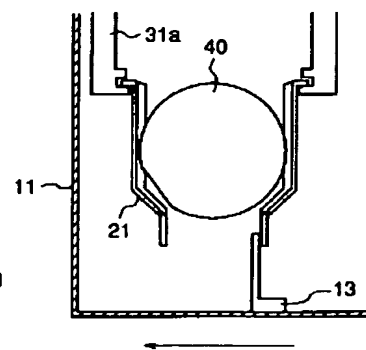
【図 7 C】



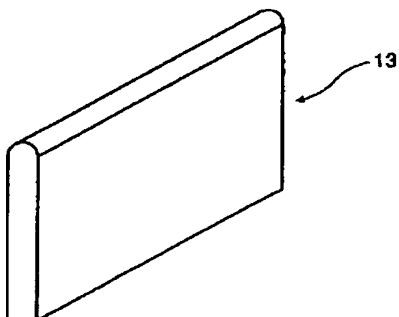
【図 7 D】



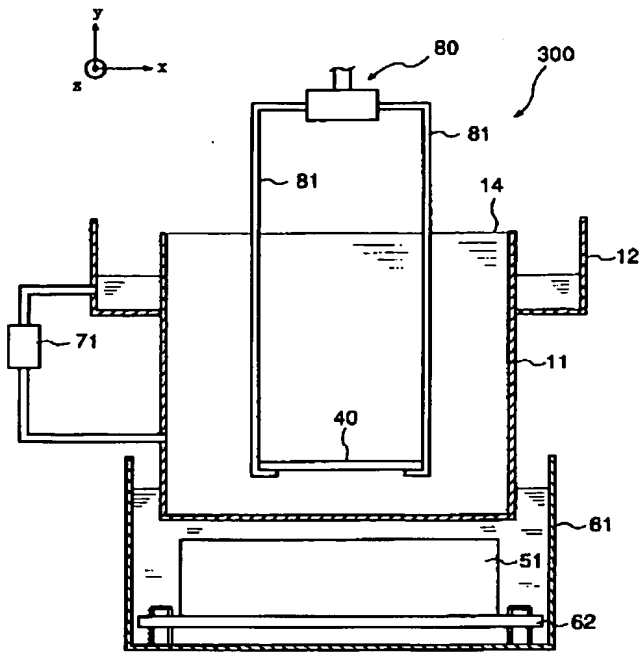
【図 7 E】



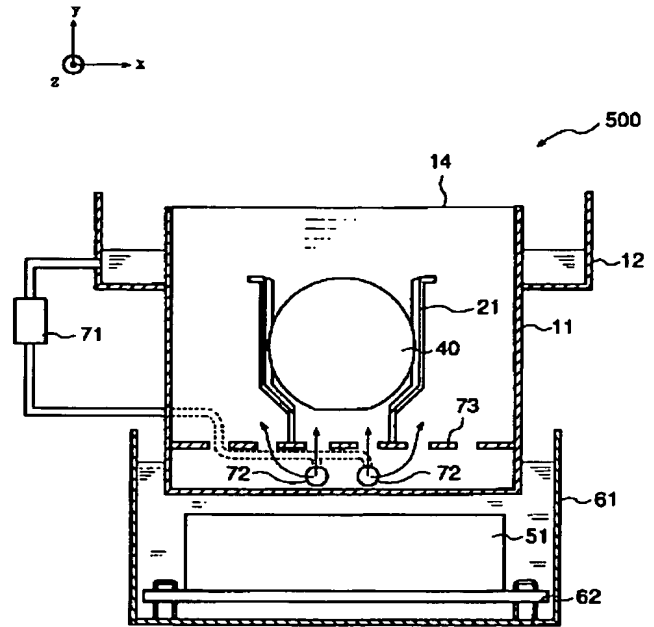
【図 8】



【図 9】

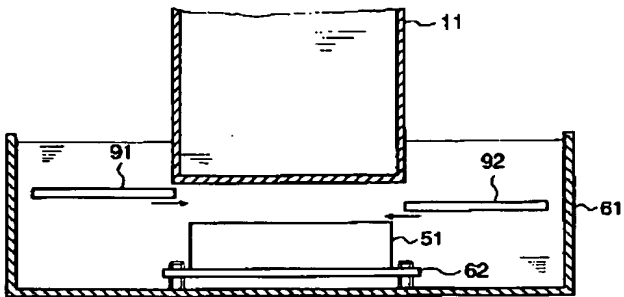


【図 10】

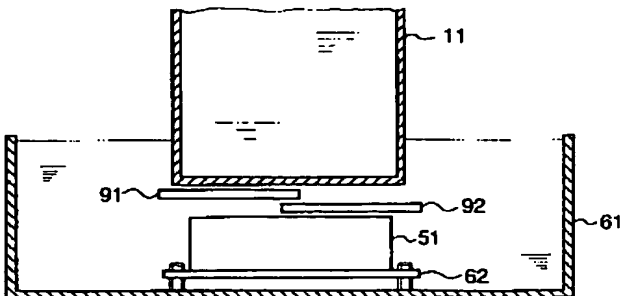


【図 11】

(a)



(b)



【図 1 2】

